

回旋速调管群聚腔研究

罗 勇, 李宏福, 谢仲怜, 喻 胜

(电子科技大学高能所, 四川成都 610054)

摘 要: 本文采用场匹配法对回旋速调管群聚腔进行了理论分析和数值模拟, 讨论了两端开孔对腔谐振特性的影响及引入损耗介质层降低 Q 值方法, 给出了一种工作频率为 34GHz, 工作模式为 TE_{01} 的回旋速调管低 Q 群聚腔的计算结果, 结果表明, 开孔大小明显影响腔内的谐振特性及驻波分布, 损耗介质层的厚度增加将使群聚腔 Q 值迅速降低, 选择适当的腔体结构, 损耗介质及其厚度能有效地降低 Q 值, 满足设计要求。

关键词: 回旋速调管; 高功率放大器; 群聚腔; 场匹配; 微波

中图分类号: TN129 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 06-0864-03

Study of Buncher Cavity in Gyroklystron

LUO Yong, LI Hongfu, XIE Zhonglian, YU Sheng

(Institute of High Energy Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: The field matching technique is applied to do the theoretical analysis and numerical simulation of the buncher cavity in gyrokyklystron. The influence of side apertures on resonance characteristic and the way that quality factor is decreased by adding an absorber have been discussed. The simulation results of buncher cavity with low quality factor in a 34GHz, TE_{01} mode gyrokyklystron are presented. The numerical calculation shows that the diameter of aperture has obvious influence on the resonance characteristic and field distribution of stationary wave in the cavity, and the quality factor decreases rapidly as the thickness of absorber increases. When the structure of cavity is correct, the absorbing medium and its thickness are selected properly; the designed parameters can be obtained.

Key words: gyrokyklystron; high power amplifier; buncher cavity; field matching; microwave

1 引言

回旋速调管以其高增益、高平均功率及一定的带宽而在毫米波雷达、通讯、受控核聚变、材料处理等方面有广泛的应用前景。许多国家投入大量人力、财力在该领域进行研究工作, 取得了一系列的研究成果^[1]。

回旋速调管群聚腔通过对回旋电子注角向速度调制, 使电子注在长的漂移运动中产生角向群聚。电子注角向群聚的好坏直接影响注波相互作用效率。因而回旋速调管的研制中, 群聚腔的研究十分重要。由于回旋速调管群聚腔两端漂移段均对工作模式截止, 在仅有铜损的情况下, 谐振腔的 Q 值很高。为了展宽频带, 保证整管在高增益下稳定工作, 需降低腔体 Q 值, 在腔内引入有耗介质, 将 Q 值降低到 100~150 之间。同时考虑两端开孔及有耗介质影响的分析的文献很少, 而采用现有软件又不能满足一些具体设计、计算的要求。因此本文采用有耗介质分区求解及突变端口场匹配方法详细研究了加入有耗介质层群聚腔谐振特性、损耗特性, Q 值及场分布。

2 理论分析

高平均功率、高增益、高效率的回旋速调管为多腔结构^[2,3]。图 1 为四腔结构回旋速调管示意图。主要包括磁控注入电子枪、输入腔(第一腔)、群聚腔(第二、三腔)、输出腔(第四腔)、收集极、输出窗等几个部分。四腔回旋速调管的两个群聚腔均为引入有耗介质层且两端开孔的突变结构。为了扩展工作带宽, 采用参差调谐, 两腔的谐振频率略有差异。

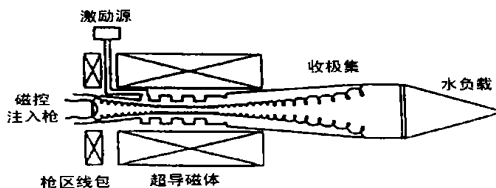


图 1 回旋速调管放大器结构示意图

回旋速调管群聚腔结构如图 2 所示。II 区为有耗介质层。其介电常数为 ϵ_2 , 磁导率为 L_2 , 电导率为 R 。在腔体两段各有

一次半径突变, r_a, r_{b1}, r_{b2}, r_c 分别为各部分的半径。

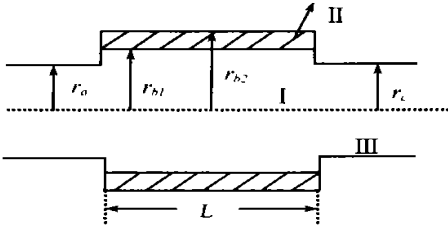


图 2 有耗突变腔结构

21.1 有耗介质波导的分区求解

回旋速调管群聚腔是在一段引入有耗介质层的波导两端接入截止波导(对工作模式)而成。为了研究群聚腔,首先对有耗介质波导中的场分布及传播特性进行分析。

将有耗介质的介电常数 ϵ_2 , 电导率 R 归并为复介电常数:

$$\hat{\epsilon}_2 = \epsilon_0 \hat{\epsilon}_r = \epsilon_2 (1 - j \frac{R}{\omega \epsilon_2}) = \epsilon_2 (1 - j \tan \delta) \quad (1)$$

利用纵向场法分别求解 I、II 区场分量表达式,再由 $r=r_{b1}$ 处的边界条件及齐次线性方程组有非零解,其系数行列式等于零等条件可得到引入有耗介质波导的特征方程(或色散方程)为:

$$[y J_m(x) G_m(y) - x J_m(x) G_m(y)] \left[\frac{E_r}{\hat{\epsilon}_2} y J_m(x) F_m(y) - x J_m(x) F_m(y) \right] + \frac{(G_m)^2 (y^2 - x^2)^2 J_m^2(x) F_m^2(y)}{\hat{\epsilon}_2 x^2 y^2 k^2} = 0 \quad (2)$$

其中: $x^2 = (k_c r_{b1})^2 = (k^2 \epsilon_1 + C^2) r_{b1}^2$

$y^2 = (k_c r_{b2})^2 = (k^2 \hat{\epsilon}_2 + C^2) r_{b2}^2$

$$F_m(k_c r) = J_m(k_c r) - \frac{J_m(k_c r_{b2})}{Y_m(k_c r_{b2})} Y_m(k_c r)$$

$$G_m(k_c r) = J_m(k_c r) - \frac{J_m(k_c r_{b1})}{Y_m(k_c r_{b1})} Y_m(k_c r)$$

J_m, Y_m 分别为 m 阶第一类和第二类复宗量贝塞尔函数。

在有耗介质波导中,传播常数为复数,同时存在实部和虚部,因而 K_{c1}, K_{c2} 也为复数。方程(2)为复宗量贝塞尔函数的超越方程,只能进行数字求解。当 $\hat{\epsilon}_2 \times \epsilon_1$ 且 $m \times 0$ 时,电波和磁波不能单独存在,必然同时存在,构成混合模。

当 $m=0$ 时,即场沿 U 方向没有变化,式(2)可简化为:

$$\frac{1}{x} \frac{J_0(x)}{J_0(x)} - \frac{1}{y} \frac{G_0(y)}{G_0(y)} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{E_r}{\hat{\epsilon}_2} \frac{J_0(x)}{J_0(x)} - \frac{1}{y} \frac{F_0(y)}{F_0(y)} = 0 \quad (4)$$

此时,电波或磁波可以单独存在,式(3)为电波单独存在应满足的方程,式(4)为磁波单独存在应满足的方程。

方程(2)或方程(3)、(4)有一系列的特征根,由此可求得相应模式的传播常数 C_m 或 C_0 ,进而可求解各模式在有耗介质波导中的场分布。

21.2 突变结构的场匹配法

突变结构的场匹配法不仅可以用来求解波导结构的不连续性问题,也可以用来求解两端开孔的突变结构谐振腔。场匹配法由模式函数的正交性,将突变两边的场分别用两个区的模式函数展开,利用突变处横向电场及横向磁场的连续性,可以得到突变两侧展开系数的线性联立方程,求解此方程,确定展开系数,从而得到突变两边的场分布,文献[4,5]给出了突变结构场匹配方法的详细分析。引入有耗介质层后,当 $m=0$ 电波或磁波可以独立存在时,场匹配方程为:

$$2[A_{0n1}^{(2)} Y_{0n}^{(2)} D_{0n} D_u + B_{0n2}^{(2)} Y_{0n}^{(2)} C_{0n}^{(2)} C_u^{(2)}] = \sum_{l=1}^2 \sum_{q=1}^{N_l} a_l^{(1)} \left[Y_{0l}^{(1)} D_{0l} D_u + \sum_{q=1}^2 \sum_{q=1}^{N_q} Y_{0q}^{(j)} C_{0q}^{(1j)} C_q^{(uj)} \right] \quad (5)$$

式中 $A_{0n1}^{(2)}, B_{0n2}^{(2)}$ 为从左右两端入射到突变处的 H_{0n}, H_{0n} 模式的幅值,对我们所研究的两端开孔腔的情况,在开孔端面,只有一端入射, $A_{0n1}^{(2)}, B_{0n2}^{(2)}$ 其中之一为零。 $Y_{0n}^{(1)}, Y_{0n}^{(2)}$ 分别为电波模式及磁波模式的波导纳, $a_l^{(1)}$ 为腔内突变处横向电场按模式函数展开的展开系数。 $C_{0q}^{(1j)}$ 为含贝塞尔函数的积分表达式。 N_1, N_2 分别为场展开所选电波和磁波模式的个数。 N_1, N_2 的选取原则是使突变两边沿轴向的总功率流相等。

式(5)是以 $a_l^{(1)}$ 为待定系数的 $N_1 + N_2$ 个复线性方程组。数值求解式(5),得到突变处横向电场:

$$E_t(r, U) = \sum_{l=1}^2 \sum_{q=1}^{N_l} a_l^{(1)} e_{0l}^{(1)}(r, U) \quad (6)$$

由此可以得到入射波在突变两边产生的各个模式行波场及入射波的反射系数 R 和 R_c :

$$A_{0n1}^{(2)} + A_{0n}^{(2)} = A_{0n1}^{(2)} (1 + R) + A_{0n2}^{(2)} \iint E_t(r, U) \# e_{0n}^{(2)*} ds$$

$$A_{0p}^{(i)} = \iint E_t(r, U) \# e_{0p}^{(i)*} ds, \quad p = n \text{ 时}, i = 1$$

$$B_{0n2}^{(2)} + B_{0n}^{(2)} = B_{0n2}^{(2)} (1 + R_c) + B_{0n1}^{(2)} \iint E_t(r, U) \# e_{0n}^{(2)*} ds$$

$$B_{0q}^{(i)} = \iint E_t(r, U) \# e_{0q}^{(i)*} ds, \quad p = n \text{ 时}, i = 1$$

21.3 谐振腔工作模式的驻波分布及 Q 值

在回旋速调管设计中,只有工作模式满足腔内谐振条件,因而群聚腔内只存在工作模式的驻波场。前面分析及数值计算得到的腔两端工作模式的反射系数 R_1, R_2 为复数,其幅角为反射相移,用 $-U_1, -U_2$ 表示,工作模式在腔内的谐振条件为:

$$2B_{0n}L + U_1 + U_2 = 2N\pi \quad (8)$$

传播常数 $C_{0n} = A_{0n} + jB_{0n}$, A_{0n} 是有耗介质引入的衰减常数, B_{0n} 为工作模式相位常数。

在群聚腔设计中,一般两端开孔相同,因而 $U_1 = U_2 = U$,可得腔内的驻波场分布为:

$$E = E_0 \sin(Hr - B_{0n}z) \quad (9)$$

其中: $H = \frac{P}{2} + \frac{U}{2}$

群聚腔 Q 值:

$$Q = \frac{XW}{P_L} \quad (10)$$

W 为腔内储能, 包括 I、II 区(有耗介质区)储能. P_L 为损耗功率, 包括有耗介质损耗及腔壁铜损. 铜损很小, 有耗介质损耗起着主导作用, 设计中通过选择适当的有耗介质和控制其厚度来达到设计的 Q 值.

3 数值计算结果

在理论分析基础上, 编制了有耗介质群聚腔分析计算软件, 对回旋速调管群聚腔进行了详细分析、计算. 下面给出一些主要计算结果.

图 3 为工作模式在腔两端的反射相移随群聚腔两端开孔大小变化曲线. 当 $r_a = 0$ 时, 即两端封闭时, 反射相移 $-U = P$, 随着 r_a 增加, 反射相移缓慢减小, 当 r_a 接近截止半径时, 反射相移则迅速下降. 因此开孔大小明显影响腔内的谐振特性和驻波分布.

图 4 为有耗介质波导中工作模式衰减常数 A 与介质厚度的关系. 随着厚度的增加, 衰减常数 A 迅速增加, 这与图 7 损耗功率的迅速增加一致.

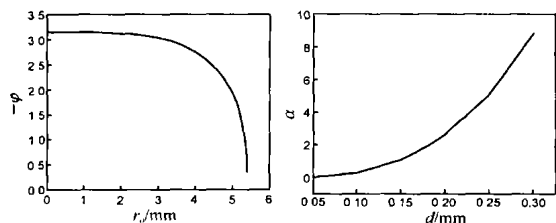


图 3 反射相移与开孔半径 r_a 的关系

图 4 衰减常数 A 与介质厚度关系

图 5 为工作模式在突变处反射相移与介质厚度 d 的关系, 当介质厚度较薄时, 反射相移 $-U$ 随 d 增加稍有下降.

图 6 为群聚腔损耗功率 P_{Lm} 及 Q 值与介质的损耗角正切的关系, 损耗功率与损耗角的正切成近似线性关系.

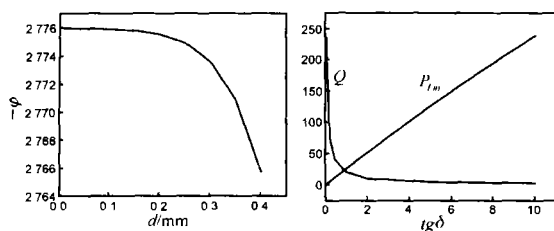


图 5 反射相移与介质厚度关系

图 6 损耗功率 P_{Lm} 及腔 Q 值与损耗角正切关系

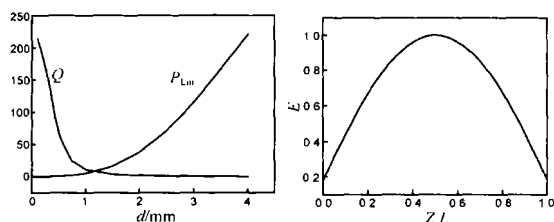


图 7 损耗功率 P_{Lm} 及腔 Q 值与介质厚度的关系

图 8 腔内驻波分布

图 7 为群聚腔内介质损耗功率 P_{Lm} 及 Q 值与有耗介质厚度 d 的关系. P_{Lm} 随 d 增加迅速增加, Q 值则随 d 的增加迅速减小, 因而为确保腔的 Q 值, 必须精确控制有耗介质的厚度.

图 8 为工作模式场 E_0 在腔内形成的驻波分布. 与两端全封闭的腔不同, 在 $z = 0$ 和 $z = L$ 处, 场的幅值不为零. 腔两端驻波场幅值的大小与两端开孔的大小 r_a 、 r_b 相关.

作为一个例子, 应用本文的理论分析和相应的计算软件, 设计计算的回旋速调管群聚腔主要参数如表 1.

表 1 四腔回旋速调管群聚腔设计值 (H_{01} 模)

	L (mm)	r (mm)	d (mm)	f_0 (GHz)	Q
腔二	814	611	0.2	33.85	115
腔三	814	612	0.2	33.45	110

4 结论

本文研究了回旋速调管群聚腔两端开孔及有耗介质层对腔内谐振特性、损耗特性、Q 值及场分布的影响, 给出了工作模式为 TE_{01} , 工作频率为 34 GHz 的一种腔体结构、尺寸的主要分析和计算结果.

回旋速调管群聚腔两端开孔大小明显影响腔内的谐振特性及驻波分布. 有耗介质层的引入对腔内谐振特性及驻波分布形状影响较小, 但使腔内损耗及 Q 值显著改变. 由于损耗介质层的厚度是一个非常敏感的因素, 因而在加入有耗介质层时, 要选择适当的损耗介质并精确地控制其厚度.

参考文献:

- [1] I I Antakov, E V Zasyplin, E V Sokolov, et al. 35GHz radar gyrotrons [A]. Conf Dig 18th Conf Infrared Millimeter Waves [C]. Washington USA: SPIE, 1993, 2104: 338- 339.
- [2] Monica Blank, Bruce G Danly, Baruch Levush. Experimental demonstration of a W-Band (94GHz) gyrotron amplifier [J]. IEEE Trans Plasma Sci, 1999, 27(2): 405- 411.
- [3] J J Choi, A H McCurdy, F Wood, et al. Experimental investigation of a high power, two cavity, 35GHz gyrotron amplifier [J]. IEEE Trans Plasma Sci, 1998, 26(3): 416- 425.
- [4] 杨仕文, 李宏福. 突变结构复合腔高频场研究 [J]. 电子学报, 1997, 25(12): 43- 47.
- [5] 李宏福, 杜品忠, 杨仕文, 等. 突变复合腔回旋管自洽场理论与模拟 [J]. 物理学报, 2000, 49(2): 312- 317.

作者简介:

罗 勇 男, 1965 年 10 月生于四川阆中, 副教授, 现在电子科技大学攻读物理电子学博士学位, 主要从事相对论电子学及高功率回旋器件的研究工作.

李宏福 男, 1936 年 11 月生于四川开县, 教授, 博导, 国务院政府特殊津贴专家, 获国家、部、省级奖十余项, 发表论文 100 余篇. 主要从事相对论电子学、微波电子学、高功率微波等领域的研究工作.